

Joonas Puumala

# HYDRAULIHYBRIDIEN KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSET

kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Kalevi Huhtala  
lokakuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Joonas Puumala: Hydraulihybridien käytännön sovellukset  
kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma  
lokakuu 2020

---

Työkonetta tai ajoneuvoa voidaan kutsua hybridiksi, kun perinteisen diesel- tai bensiinimootorin rinnalle tuodaan toinen teholähde tuottamaan haluttuja liikkeitä. Yleensä hybridit toteutetaan keräämällä polttomootorilla tuotettua energiaa, joka muuten ei olisi tullut käytetyksi. Energiaa kerätään yleensä jarrutuksien yhteydessä energiasäiliöön, josta se uudelleenohjataan systeemin käytettäväksi.

Hybridit voidaan luokitella monella tapaa. Yleisesti hybridit jaetaan rinnakkais- ja sarjahybrideihin, joista sarjahybrideitä suositaan energiatehokkuuden kannalta enemmän. Sarjahybridillä on ominaisuus käyttää pelkästään uudelleenkierrätettyä energiaa ajon aikana, jolloin polttomoottori voidaan pitää sammutettuna. Rinnakkaishybridissä polttomoottori ja hydraulinen pumppumoottori ovat molemmat suoraan yhteydessä vetoakseliin, jolloin systeemissä polttomoottori ei voi toimia aina parhaalla tehoalueellaan. Rinnakkaishybridi on kuitenkin helppo lisätä täysdieseliin jälkeinpäin, mikä kasvattaa sen tämän hetken suosiota ajoneuvoissa ja työkoineissa.

Hybridit voidaan jakaa myös sähkö- ja hydraulihybrideihin, jotka ovat täällä hetkellä käytetyimmät hybridimuodot. Sähköhybrideitä suositaan enemmän pienemmissä autoissa ja koineissa sähköakun hyvän energiatihyden takia. Hydraulihybrideitä käytetään puolestaan paljon työkoneissa ja raskaissa ajoneuvoissa suuren tehотиheyden takia. Hyvän tehottiheyden myötä kuormalle voidaan tuottaa suuria voimia ja momentteja. Hydraulihybriditekniikkaa voidaan käyttää jarrutusenergian keräämisen lisäksi myös muiden liikkeiden pysäyttämiseen ja energian talteen ottoon. Esimerkiksi työkoneissa kuten kaivinkoneissa, pyörivän ylävaunun pysäyttämiseen tarvittava energia voidaan ottaa talteen ja käyttää seuraavan liikkeen tuottamiseen. Myös esimerkiksi jousituksen ja työkonepuomien laskuliikkeissä on hyödynnetty hybriditekniikkaa potentiaalienergian talteenottamiseksi.

Hydraulihybridien polttoainesäästöt ovat riippuvaisia monesta tekijästä, mutta keskimääräinen polttoainesäästö maantie- ja kaupunkiajossa on noin puolet hybridittömään ajoneuvoon verrattuna. Polttoainesäästöjen myötä vähenee myös haitallisten päästöjen määrä merkittävästi, jolloin ajoneuvot ja työkoneet ovat ympäristöystävällisempiä.

Avainsanat: hydraulihybridi, sarjahybridi, rinnakkaishybridi, energian säästö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Joonas Puumala: Practical applications of hydraulic hybrids  
Bachelor's Thesis  
Tampere University  
Degree Programme in Engineering Sciences, Bachelor of Science  
October 2020

---

A work machine or vehicle can be called a hybrid when another power source is introduced alongside a conventional diesel or gasoline engine to produce the desired movements. Generally, hybrids are implemented by collecting energy produced by an internal combustion engine that would not otherwise have been used. Energy is usually collected during braking into an energy reservoir from which it is redirected to the system.

Hybrids can be classified in many ways. In general, hybrids are divided into parallel and series hybrids, of which series hybrids are more preferred in terms of energy efficiency. The series hybrid can use the recycled energy to drive when the internal combustion engine is turned off. In a parallel hybrid, the internal combustion engine and the hydraulic pump motor are both directly connected to a drive shaft, so that in the system the internal combustion engine cannot always operate at its best power range. However, the parallel hybrid is easy to add to the full diesel work machine or vehicle afterward.

Hybrids can also be divided into electric and hydraulic hybrids, which are the most used hybrid forms at present. Electric hybrids are more preferred in smaller cars and machines due to the good energy density of the electric battery. Hydraulic hybrids are widely used in work machines and heavy vehicles due to their high power density, which can produce high forces and moments for the load. In addition to collecting braking energy, hydraulic hybrid technology can also be used to stop other movements and recover energy. For example, in work machines such as excavators, the energy required to stop the rotating cab is recovered and used to produce the next movement. Hybrid technology has also been used to recover potential energy, for example in the movements of suspension and booms.

The fuel savings of hydraulic hybrids depend on many factors, but the average fuel savings on the highway and urban driving are about half that of a non-hybrid vehicle. Fuel savings also significantly reduce harmful emissions, making vehicles and work machines more environmentally friendly.

Keywords: hydraulic hybrid, series hybrid, parallel hybrid, energy saving

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ENERGIAN VARASTOINTI .....	3
2.1 Rinnakkaishybridi .....	3
2.2 Sarjahybridi .....	5
3. VERTAILU SÄHKÖHYBRIDIIN .....	7
3.1 Sähköhybridi yleisesti .....	7
3.2 Energiatehokkuus .....	8
3.3 Kannattavuus .....	9
4. HYDRAULIHYBRIDIEN KÄYTTÖKOhteITA .....	12
4.1 Maantieajo .....	12
4.2 Liikkuvat työkoneet .....	14
5. ESIMERKKEJÄ KÄYTÖSTÄ .....	15
5.1 Caterpillar 336E -kaivinkone .....	15
5.2 UPS-jakeluauto .....	16
5.3 Eaton-trukki .....	18
6. YHTEENVETO .....	20
LÄHTEET .....	21

## LYHENTEET

EPA	engl. Environmental Protection Agency, ympäristönsuojeluvirasto
HEV	engl. Hydraulic Electric Vehicle, sähköhybridiajoneuvo
HHV	engl. Hydraulic Hybrid Vehicle, hydraulihybridiajoneuvo
NEDC	engl. New European Driving Cycle, uusi eurooppalainen ajosykli

# 1. JOHDANTO

Polttomoottorien käyttö on vuosi vuodelta kalliimpaa, sekä päästörajoituksia kiristetään jatkuvasti. Ongelman ratkaisuksi on otettu käyttöön hybridijärjestelmiä, jotka pienentävät ajoneuvojen ja työkoneiden polttoaineen kulutusta ja samalla laskevat pidemmän aikavälin kustannuksia. Hybridien etuna on myös käytännöllisyys ja ympäristöystävällisyys. Hybridijärjestelmissä on vähintään kaksi energialähdettä. Dieselmoottorin lisäksi hybridiajoneuvoissa ja -työkoneissa käytetään sähkö- tai hydraulimoottoria, jotka tarvitsevat omat erilliset energiavarastonsa.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään hybrideitä, joista tarkastellaan tarkemmin hydraulihybrideitä. Työssä käydään läpi hydraulihybridien toimintaa ja verrataan hydraulihybrideitä sähköhybrideihin tehokkuuden ja taloudellisen näkökulman kannalta. Lisäksi työssä esitellään hydraulitekniikkaa hyödyntäviä ajoneuvoja ja koneita, joissa energiaa pystytään säästämään eri tavoin, sekä annetaan käytännön esimerkkejä tämän hetken sovellutuksista hydraulitekniikassa.

Hybriditekniikkaa hyödynnetään paljon työkoneissa, koska niiden liikkeet tarvitsevat ajoittaisia tehopiikkejä. Suuren tehotarpeen vaatima työliike on mahdollista toteuttaa hydraulienenergialla, jolloin tehoa ei tarvitse tuottaa polttomoottorilta. Tällöin polttomoottori voidaan mitoittaa alkuperäistä pienemmäksi. Toisaalta myös maantiellä kulkevia hydraulihybridiajoneuvoja on tuotannossa eri valmistajilla ja tulevaisuudessa varmasti vielä enemmän. Kuitenkin tällä hetkellä hydraulitekniikkaa hyödynnetään enimmäkseen raskaammissa ajoneuvoissa.

Tällä hetkellä käytössä on pääasiassa sähkö- sekä hydraulihybrideitä. Nämä voidaan jakaa vielä sarja- ja rinnakkaishybrideihin, joilla on toisistaan poikkeavia ominaisuuksia. Sähkö- ja hydraulihybrideillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, mutta tärkeää on osata valita oikeat vaihtoehdot järjestelmiin, jolloin hukkaenergiaa tuotetaan tulevaisuudessa entistä vähemmän. Hybrideillä saavutetut energiansäästöt ovat nykyäänkin jo huomattavia. Esimerkiksi kaivinkoneen hydraulihybridi-järjestelmällä on saavutettu jopa neljänneksen polttoainesäästöjä vastaavaan dieselkaivinkoneeseen verrattuna [12]. Kaupunkiajossa jarrutusenergiaa keräävä hydraulihybridi voi säästää polttoainetta jopa 70 % täysdieseliin verrattuna.

Kyseinen ajoneuvo on toteutettu sarjahybridinä, jolloin sen on mahdollista liikkua polttomoottori sammutettuna ja käyttää ainoastaan hydrauliakkuihin varattua energiaa [17].

## 2. ENERGIAN VARASTOINTI

Mekaanisten systeemien ideana on käyttää mahdollisimman paljon tuotettua energiaa varsinaiseen käyttökohteeseensa eli usein tietyn liikkeen tuottamiseen. Todellisuudessa läheskään kaikkea energiaa ei pystytä hyödyntämään, mikä ei ole useimmissa tapauksissa toivottua. Hybridiratkaisuissa hyötysuhdetta parannetaan ottamalla talteen tuotettua energiaa, joka muuten olisi jäänyt käyttämättä. Talteen otettu energia uudelleenohjataan haluttuun käyttötarkoitukseen.

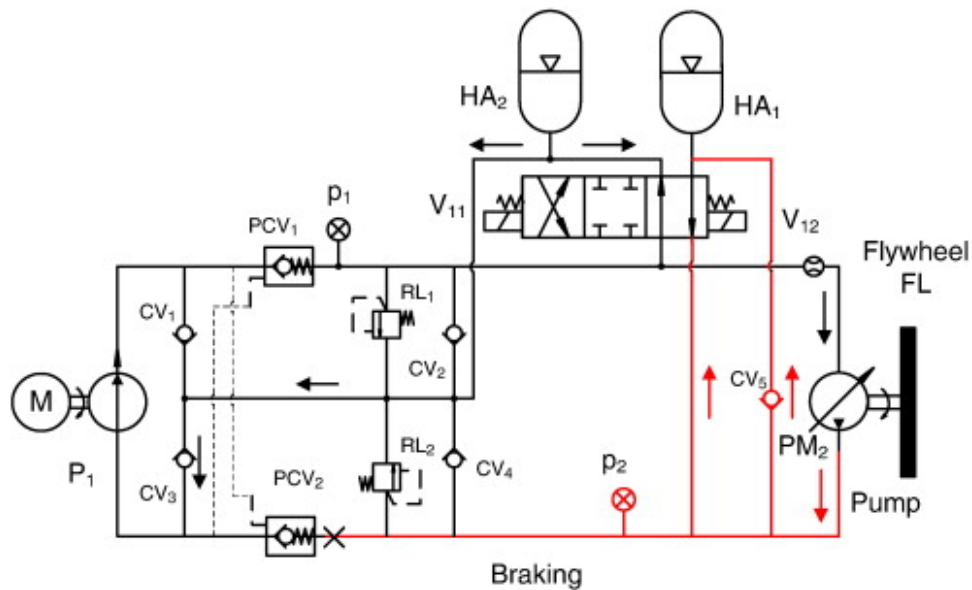
Energiaa varastoidaan yleensä hydraulisesti tai sähköisesti. Tässä luvussa käsitellään hydraulihybridien toimintaa rinnan sekä sarjaan kytkettyinä polttomoottorin kanssa. Hydraulihybridi toteutetaan paineakun ja matalan paineen säiliön avulla. [6] Hydraulihybrideitä käytetään raskaissa ajoneuvoissa ja työkoneissa, mutta myös esimerkiksi henkilöautoissa. Sähköhybrideitä käytetään myös raskaissa työkoneissa ja ajoneuvoissa, koska niissä käytetyt momentit ovat suuria. Henkilöautomarkkinoilla on lisäksi runsaasti sähköhybridiautoja.

### 2.1 Rinnakkaishybridi

Rinnakkaishybridin toiminta ja tehokkuus perustuu dieselmoottorin ja hydraulisen paineakun välisen käyttösuhteen optimointiin. Paineakun käyttö voidaan jakaa käyttö- ja varastointivaiheisiin, jotka vaihtelevat ajon aikana. Kuvassa 1 on merkitty matalan paineen säiliö ( $HA_2$ ) ja korkean paineen akku ( $HA_1$ ), joiden käyttöä ohjataan venttiilillä. Pumppumoottori ( $PM_2$ ) toimii joko pumppuna tai moottorina tilanteesta riippuen. Vauhtipyörällä (FL) kuvataan akselia, jota myös dieselmoottori pyörittää. Ajon aikana sopivissa kohdissa käytetään hydraulisesti varastoitua energiaa akselin pyörittämiseen. Tällöin pumppumoottori toimii moottorina, koska hydraulinesteen virtaus on korkeasta matalaan paineeseen. [9]







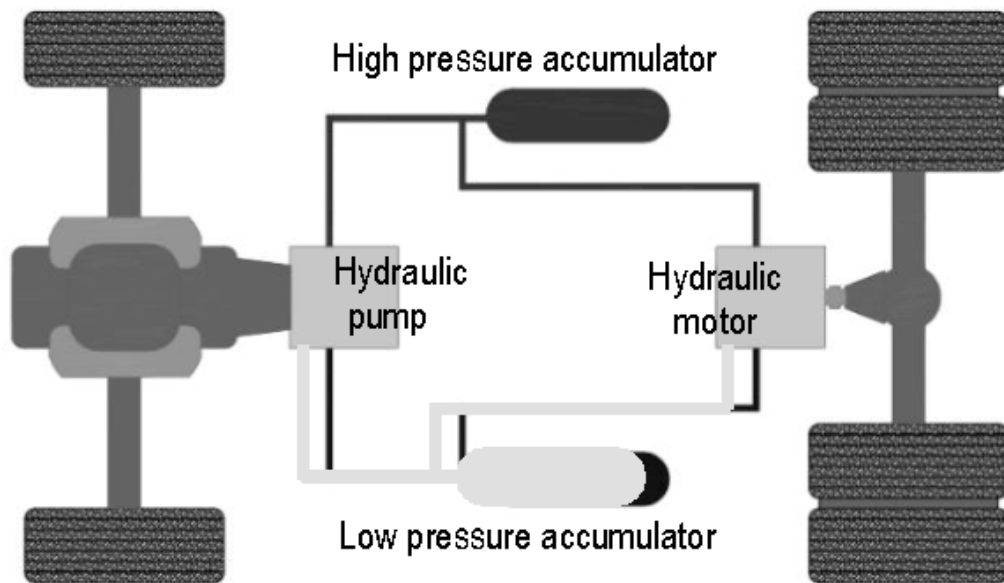
**Kuva 2.** Hydraulikaavio jarrutuksessa [9].

Hydraulipumpulle asetetaan tehoraja, jonka yläpuolella käytetään pelkästään polttomoottoria. Tämä tehdään, koska polttomoottorilla on parempi hyötysuhde korkeilla nopeuksilla. Tehoraja on yleensä pumppumoottorin maksimiteho. [10]

## 2.2 Sarjahybridi

Sarjahybridin peruskomponentit ovat samat rinnan kytkettyyn hybridiin verrattuna. Suurin ero on hydraulisen pumppumoottorin sijoittaminen sarjaan polttomoottorin kanssa. Tällöin polttomoottori ei ole suoraan yhteydessä renkaisiin, vaan välissä on akselia pyörittävä pumppumoottori. [7]

Polttomoottori pyörittää kuvassa 3 merkittyä hydraulipumppua. Hydraulipumppu pumppaa hydraulinestettä hydraulimoottorin läpi, mikä saa akselin pyörittämään renkaita. Hydraulimoottoria pyörittävä energia on peräisin polttomoottorista tai korkean paineen akusta, mutta ei molemmista samaan aikaan. Tällöin voi olla tarpeellista lisätä vielä yksi säiliö hydraulinesteelle. Sitä käytetään silloin, kun käytetään pelkästään polttomoottoria liikkeen tuottamiseen ja varmistetaan nesteen riittävyys hydraulimoottorille. Ylimääräistä tankkia ei tarvita, jos käytetään ainoastaan matalan paineen säiliötä polttomoottoriajossa. Toisaalta pumppu voi käyttää osan polttomoottorin energiasta korkean paineen akun täyttämiseen sen lisäksi, että nestettä pumpataan korkean paineen säiliöön jarrutusten yhteydessä. [7]



**Kuva 3.** Sarjaan kytketty hydraulihybridi [3].

Rinnakkaishybridin tavoin sarjahybridin toiminta voidaan jakaa kolmeen osaan ajotapahtumien perusteella. Kevyessä kiihdytyksessä ja lyhyessä ajossa pumppumoottori käyttää korkean paineen hydraulinestettä renkaiden pyörittämiseen ja varastoi nesteen matalan paineen säiliöön. Toiminta edellyttää kuitenkin, että korkean paineen akussa on riittävästi paineistettua nestettä. Jos säiliön paine laskee alle ennalta määritetyn paineen, polttomoottori käynnistyy ja pyörittää renkaita. Paineen lasku on mahdollista erityisesti pitkän matkan ajossa ja kovissa kiihdytyksissä. Kun korkean paineen akussa on riittävästi nestettä, polttomoottori kytkeytyy päälle vain energiatehokkaimmissa kohdissa ajon aikana. Lopulta polttomoottori kytkeytyy kokonaan pois päältä, kunnes painetaso säiliössä on taas liian alhainen. Tämä on mahdollista, koska polttomoottoria ei ole kytketty suoraan renkaisiin. Jarrutusten yhteydessä liike-energia muutetaan hydraulipumpulla nesteen paineistamiseen ja varastointiin korkean paineen akkuun. Tämä on käytännöllistä erityisesti kaupunkiajossa, jossa kiihdytyksiä ja jarrutuksia on paljon. Jarrutuksessa varastoitu energia voidaan käyttää uudelleen seuraavaan kiihdytykseen, jolloin muuten hukatusta jarrutusenergiasta noin 70 % saadaan uudelleenkäytettyä. [7]

### 3. VERTAILU SÄHKÖHYBRIDIIN

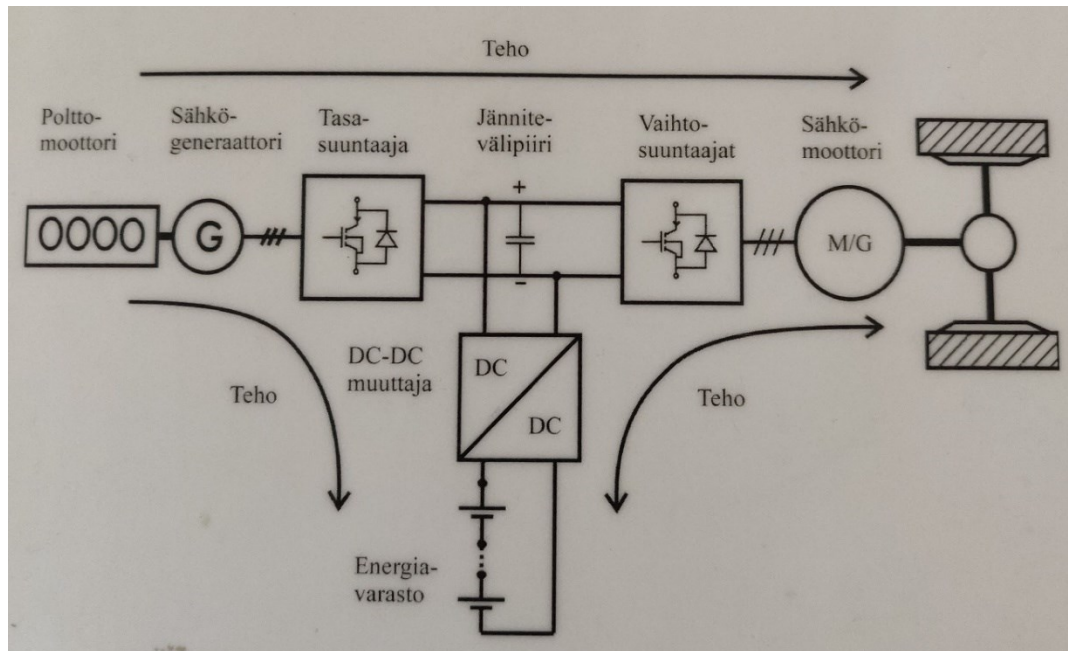
Hydraulisissa ja sähköisissä hybrideissä on paljon samaa, mutta myös eroavaisuuksia. Molemmilla tärkeintä on kuitenkin pyrkimys energiatehokkuuteen ja polttomoottorin käytön vähentämiseen. Tässä luvussa tarkastellaan eroja ja yhtäläisyyksiä hydraulisten ja sähköisten hybridien välillä.

#### 3.1 Sähköhybridi yleisesti

Hybrideille ominaista on varastoida energiaa, mutta varastointitapa vaihtelee. Hydraulihybridin paineakut korvataan sähköhybrideissä sähköisellä energiavarastolla, joka voi olla esimerkiksi paristo tai superkondensaattori [13][4]. Hydraulipumpun korvaa generaattori ja moottorina toimii sähkömoottori. Idea on siis sama, mutta toteutustapa on erilainen. Yksi käytännön ero sähkö- ja hydraulihybridin välillä on, että sähköhybridiä voidaan ladata ajoneuvon ollessa pois käytöstä. Vastaavasti Hydraulihybridin energia on peräisin polttoaineesta, jota voidaan käyttää vain ajoneuvon polttomoottorin ollessa käynnissä.

Samaan tapaan kuin hydraulihybrideissä, sähköhybridi voidaan toteuttaa rinnan- tai sarjaan kytkettynä. Myös kytkentätapa on hyvin samanlainen. Sarjaan kytketyssä sähköhybridissä polttomoottori ei ole suoraan kiinni loppukuormassa, vaan generaattorissa, joka tuottaa sähköä. Sähkö ohjataan energiavarastoon tai suoraan sähkömoottorille, joka pyörittää ajoneuvon vetoakselia. Huonona puolena sarjahybridissä on monivaiheinen energian muunto, joka aiheuttaa energiahäviöitä. Sarjahybridin rakennetta on havainnollistettu kuvassa 4. Sarjahybrideitä käytetään erityisesti raskaammissa ajoneuvoissa ja työkoneissa. [8]

Rinnakkaishybridissä polttomoottori ja sähkömoottori molemmat voivat tuottaa tehoa vetoakselille. Sarjakytkentään verrattuna rinnan kytketyssä järjestelmässä tarvitaan vähemmän energiamuunnoksia, jolloin poltto- ja sähkömoottori voidaan mitoittaa pienemmiksi. Haittapuolena on kuitenkin polttomoottorin kytkentä suoraan kuormaan, jolloin polttomoottorin käyttö pelkästään parhaalla tehoalueella ei ole mahdollista. [8] Sarjahybridin yksi hyöty on myös napamoottoreiden käytön mahdollistaminen, eli moottorin sijoittamisen renkaan sisään, jolloin tilaa vievää vetoakselia ei tarvita [8].



**Kuva 4.** Sähköhybridin sarjaankytkentä [8].

### 3.2 Energiatehokkuus

Hydrauli- ja sähköhybrideillä on omat hyvät ja huonot ominaisuutensa. Huomattavaa kuitenkin on, että ominaisuudet ovat lähes vastakkaisia verrattaessa hydrauli- ja sähköhybrideitä keskenään. Taulukossa 1 on esitetty hydraulihybridin (HHV, hydraulic hybrid vehicle) ja sähköhybridin (HEV, hydraulic electric vehicle) ominaisuuksia yleisellä tasolla.

Taulukko 1. Hydrauli- ja sähköhybridin vertailu [4].

Parameter	HHV	HEV
Energy density	Low	High
Power density	High	Low
Braking regeneration efficiency	80%	30%
Regeneration charging	Quick	Slow
Power to weight ratio	High	Low
Initial cost and maintenance cost	Low	High

Hydrauli-järjestelmät ovat tunnettuja hyvästä tehotehokkuudestaan, eli pienillä komponenteilla saadaan aikaan suhteellisen suuri voima kuormalle. Ainakin verrattuna vastaavaan sähköiseen ratkaisuun, jossa saman momentin tuottoon vaaditaan suuri tai useampi sähkömoottori. Hydrauli-järjestelmän etuna on myös hyvä hyötysuhde energian muunnossa, sillä mitään ylimääräistä ei tarvita polttomoottorin, pumpun ja akun lisäksi. Kuten aiemminkin on

todettu, hydraulijärjestelmät sopivat hyvin raskaisiin ajoneuvoihin ja tämä puoltaa sitä entisestään. Hydraulisilla akuilla on kuitenkin huonompi energiatiheys sähköisiin verrattuna, mikä vaikeuttaa optimointia energian käytössä. Energian varastointitapa on siis valittava tapauskohtaisesti. [13] Yhdellä energiavarastolla ei siis voida toteuttaa hyvää huipputehoa ja hyvää energiatheyttä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitelty ratkaisua, jossa sähkö- ja hydraulihybridi yhdistetään hyödyntäen molempien parhaita ominaisuuksia [13].

Energiavaraston hyvä energiatiheys ei ole hyödyllinen, jos uudelleen käytettävää energiaa ei saada muunnettua tehokkaasti. Taulukon 1 mukaan sähköhybridin energian muuntotehokkuus auton liike-energiasta sähköenergiaksi on vain 30 %, kun vastaava tehokkuus hydraulisella muunnolla on 80 %. Tämä johtuu erityisesti hydraulihybridin nopeasta kyvystä muuntaa energiaa, jolloin lyhyillä ja kevyillä jarrutuksillakin saadaan aikaiseksi energiasäästöjä. [13] Sähkökäyttöisen ajoneuvon etuna on kuitenkin latausominaisuus silloinkin, kun ajoneuvo on pysäytettynä. Tällöin hyvä energiatiheys saadaan hyödynnettyä.

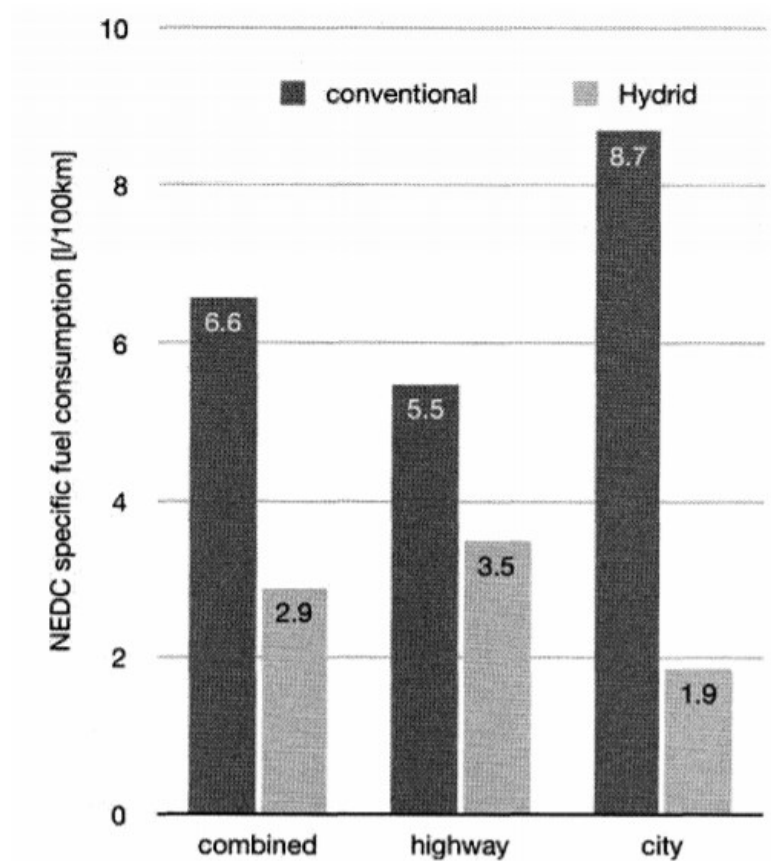
### 3.3 Kannattavuus

Hybrideillä saavutetaan taloudellisia säästöjä, mutta ne myös maksavat enemmän kuin perinteiset koneet ja ajoneuvot. Investointien yhteydessä takaisinmaksuaika merkitsee paljon. Hybridien kohdalla erityisen merkittävä on käyttöaika, jonka jälkeen hybridi on kannattavampi vaihtoehto tavalliseen koneeseen tai ajoneuvoon verrattuna.

Hybridin kannattavuus perustuu suurimmaksi osaksi polttoainesäästöihin. Sarjaan kytketyllä hybridillä saavutetaan parempi hyötysuhde polttoaineelle kuin rinnakkasihybridillä. Lisäksi jotta hyvä polttoaine tehokkuus saavutetaan, on kaikissa yksittäisissä tehonsiirtokomponenteissa oltava hyvä syklitehokkuus. Yksikin huono hyötysuhde tai viallisuus komponenteissa voi tuhota hybridin tarkoituksen koneissa. Tällöin haluttuja hyötyjä ei saada käytännössä toteutettua ja kuluja voi tulla jopa enemmän kuin ilman hybridiä. On siis tärkeää pitää hybridikoneet huollettuina ja tarkastaa järjestelmän toiminta säännöllisesti. [1]

Kuvassa 5 on esitetty polttoaineen kulutus NEDC-testissä (New European Driving Cycle) hydraulihybridille ja vastaavalle tavalliselle nelivetoautolle. Hybridillä on huomattavasti pienempi kulutus maantiellä ja erityisesti kaupungissa. Testitulosten absoluuttiset arvot eivät välttämättä käytännössä toteudu, mutta hybridin ja tavanomaisen auton suhteellinen ero on suuntaa antava. Tulosten perusteella hybridi kuluttaa parhaimmillaan himan yli 20 % siitä polttoainemäärästä, jonka samankaltainen pelkästään polttomoottorilla toimiva auto kuluttaa. [1] Hybridiautolla kestää kuitenkin vuosia saavuttaa tavanomaisen auton hintataso, kun

otetaan huomioon kaikki autoilun kustannukset. EPA:n mukaan UPS:n hybridauton hinta on mahdollista saada takaisin kolmen vuoden kuluessa, mutta vähäisellä käytöllä olevat ajoneuvot tarvitsevat huomattavasti pidemmän ajan [17].



**Kuva 5.** Polttoaineen kulutus hydraulihybridin ja tavallisen vertailuauton välillä NEDC-testissä [1].

Tällä hetkellä autovalmistajat keskittyvät vahvasti sähköautojen kehittämiseen. Yksi syy on todennäköisesti täyssähkö- ja sähköhybridautojen valmistamisen ja ostamisen tukeminen rahallisesti ja verohelpotuksilla. Sähköautot eivät välttämättä ole kuitenkaan ostajalle edullisin vaihtoehto, sillä myös sähkö maksaa. Traficom (liikenne- ja viestintäviraston) Vernelle (Tampereen teknillisen yliopiston Liikenteen tutkimuskeskukselle) teettämän tutkimuksen mukaan sähköautoilu on kannattavaa fossiilisen polttoaineen autoon verrattuna, jos ajaa vuodessa yli 30 000 km. Silti erot ovat hyvin pieniä, kun otetaan huomioon kaikki tekijät kuten polttoaineen kulutus, sähkön hinta, jälleenmyyntiarvo, verot ja hankintahinta. Verne käyttää laskelmissaan 10 vuoden aikajaksoa, jonka aikana ajetaan 15 000 km vuodessa. Lattavan sähköhybridin kulut ovat vuodessa Vernen arvion mukaan noin 6000 €, joka on

korkeampi kuin diesel ja bensiini autojen kulut noin 5500 € vuodessa. Vastaavasti täyssähköauton vuotuiset kustannukset olivat tuet huomioon ottaen noin 5100 € vuodessa. [15] Hydraulihybridiautoille ei kuitenkaan tutkimuksessa tehty laskelmia, mutta kuvan 5 datan huomioiden kulut olisi mahdollista saada melko alhaisiksi. Autovalmistajien tulisi ottaa hydraulihybridit tosissaan mukaan tuotekehitykseen sähköautojen ollessa vielä pienellä käytöllä.



## 4. HYDRAULIHYBRIDIEN KÄYTTÖKOhteITA

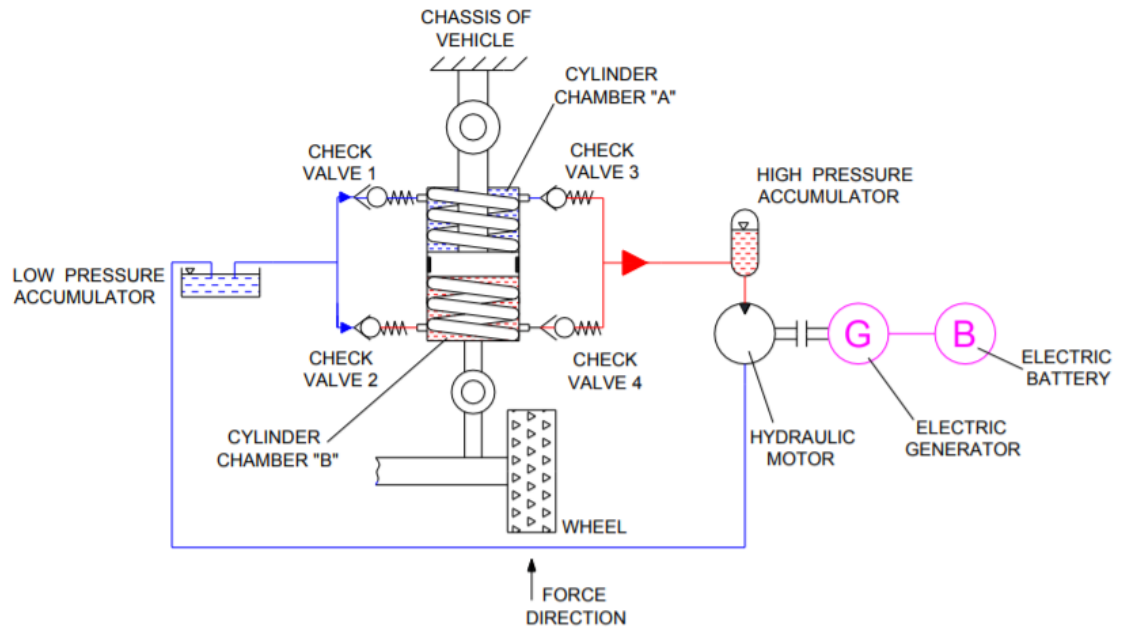
Hybridit ovat tunkeutuneen markkinoille perinteisten polttomoottorilla toimivien ajoneuvojen ja työkoneiden rinnalle. Tässä luvussa esitellään erilaisia tapoja hyödyntää hybriditeknikkaa energian säästämiseksi.

### 4.1 Maantieajo

Ensimmäiset hybridiautot olivat sähköhybrideitä, mutta hydraulihybridit ja muut energiansäästöratkaisut ovat yhä yleisimpiä. Maantiellä liikkuu paljon ajoneuvoja, mutta autovalmistajat ovat vasta viime vuosina alkaneet kehittämään omia hybridiautojaan matkustaja ja kuljetuskäyttöön. Poikkeuksiakin löytyy, siitä esimerkkinä yritys UPS (United Parcel Service), joka on ottanut käyttöönsä erilaisia hybridiratkaisuja jakeluajoneuvoissaan.

Hydraulihybridit sopivat hyvin kaupunkiliikenteeseen ja teknologiaa voisi hyödyntää esimerkiksi julkisen liikenteen busseissa, jakelu- ja jäteautoissa. Näiden lisäksi myös henkilöautoihin on kehitetty hydraulisia hybridiratkaisuja. Toisaalta hydraulihybrideillä on myös haittapuolia. Esimerkiksi hydraulikasta aiheutuvat meluhaitat ovat kaupunkiympäristössä vaikea ratkaista. Tämä on luultavasti yksi syy sille, että hydraulihybrideitä suositaan erityisesti työkoneissa ja sähköä pyritään käyttämään kaupunkiajoneuvoihin.

Jarrutusenergian talteenotto ei ole ainoa tapa kerätä energiaa ajoneuvon uusiokäyttöön. Tvrdić et al. [14] esittävät artikkelissaan, että energiaa on mahdollista kerätä myös ajoneuvon jousistossa syntyvästä liikkeestä. Kuvassa 6 on esitetty systeemin toimintaperiaate tilanteessa, jossa ajoneuvo painuu maata vasten ja jouset tiivistyvät. Systeemin hydraulikomponentit ovat matalan paineen säiliö, jousisylinteri, korkean paineen akku sekä hydraulimoottori. Hydraulimoottoria voidaan käyttää esimerkiksi pyörittämään sähkögeneraattoria, jonka tuottama sähkö ohjataan talteen paristoon. Jousituksesta peräisin oleva energia on täysin uusiutuvaa, eikä sitä ole tuotettu muilla energianlähteillä, kuten jarrutuksen tapauksessa. Siksi tämä tekniikka tulisi olemaan tulevaisuudessa hyödyllinen energianlähde ja haitallisten päästöjen vähentäjä. [14]



**Kuva 6.** Jousiston energinavarastointi [14].

Hydraulihybridien yksi ongelma on auton sähkölaitteet kuten radio ja valot, koska niiden tarvitsema sähkö olisi edelleen peräisin polttoaineesta. Jousiston erillinen energiankierto voisi olla ratkaisu tähän ongelmaan, koska kiertynyt hydraulienergia voitaisiin muuntaa sähköksi ja ohjata pelkästään autossa olevien sähkölaitteiden käyttöön.

## 4.2 Liikkuvat työkoneet

Työkoneissa hyödynnetään hydraulihybrideitä, koska työkoneiden käyttämät voimat ja momentit ovat suuria. Tämän takia koneiden energiankulutus on myös korkea. Ensisijaisena energianlähteenä useimmissa työkoneissa on fossiilinen polttoaine, jonka polttomoottori muuntaa liike-energiaksi. Tuotettua energiaa pystytään varastoimaan hydrauliakkuihin erilaisissa tilanteissa, joissa liikkeen kiihtyvyys on negatiivinen. Esimerkiksi kaivinkoneissa ohjaamon pyörimisliikkeen hidastamiseen käytetään hydraulipumppua, joka varastoi liike-energian hydrauliakkuun [11][12].

Hydraulihybriditekniikkaa hyödynnetään hyvin erilaisissa koneissa. Seuraavassa luvussa on esitelty tarkemmin kaivinkoneen ja trukin hydraulihybridiratkaisuja, mutta samaa tekniikkaa hyödynnetään myös esimerkiksi traktoreissa, metsäkoneissa ja vetoautoissa. Erityistä hyötyä energian säästöstä on koneille, joiden käyttöympäristö on kaukana tankkauspisteistä tai jonne on ajettava työkoneella pitkä matka, kuten metsäkoneella. Tällöin huoltokatkoja tarvitaan vähemmän ja koneella on mahdollista työskennellä pidempään, mikä kasvattaa työn tehokkuutta.

Työkoneissa energiaa varastoidaan yleensä jarrutusliikkeistä, mutta puomillisissa työkoneissa on mahdollista varastoida myös puomin potentiaalienergiaa. Vucovic et al. [16] esittävät tutkimuksessaan systeemin, jonka tavoitteena on kaivinkoneen energiansäästö. Systemi kierrättää puomin sylinteriltä tulevaa nestettä paineakkuihin, joista paineistettua nestettä voi uudelleen käyttää. Testissä työkierrolle saatiin jopa 55 prosenttia parempi tehokkuus tavalliseen kaivinkoneeseen verrattuna. [16]

## 5. ESIMERKKEJÄ KÄYTÖSTÄ

Tässä luvussa esitellään esimerkkejä hybridikoneista ja ajoneuvoista, joiden käyttötarkoitukset ovat hyvin erilaisia. Esittelyssä on kaivinkone, kuljetusauto sekä trukki. Näiden lisäksi monet raskaat kuljetusautot ja puomilliset koneet kuten harvesterit voivat myös hyödyntää hydraulihybriditekniikkaa.

### 5.1 Caterpillar 336E -kaivinkone

Caterpillar on muiden työkonevalmistajien rinnalla alkanut kehittämään hybridiratkaisujaan eteenpäin tavoitteenaan asiakkaan käyttökustannusten alentaminen. Insinöörit ovat tutkineet ja kokeilleet erilaisia ratkaisuja energian varastointiin. Tuloksena on ollut hydraulihybridien parempi energiansäästökyky sähköhybrideihin verrattuna, vaikkakin kehitystyö molempien suhteen on edelleen vahvasti käynnissä. Kuvassa 7 on esitetty Caterpillarin hybridikaivinkone malli 336E LH. Kone on ensimmäisiä Caterpillarin tuottamia hydraulihybridimalleja. [11][12]



**Kuva 7.** Kaivinkone Caterpillar 336E LH [11].

Caterpillar lupaa mallille 336E LH neljänneksen polttoainesäästön vastaavaan perusmalliin 336E L verrattuna. Lisäksi polttoaineen kulutus on puolet vanhempaan 336 D -malliin verrattuna, joten käyttökustannukset ovat huomattavasti alhaisemmat polttoaineen osalta.

[12] Nämä säästöt ovat peräisin ylävaunun jarrutuksesta kerätystä energiasta. Jatkokehityksenä energiaa voisi kerätä myös esimerkiksi puomin laskuliikkeestä, jolloin tuotettua energiaa saataisiin talteen vielä entistä enemmän.

## 5.2 UPS-jakeluauto

Vuonna 2006 EPA (U.S. Environmental Protection Agency) julkisti ensimmäisen kuljetuskäyttöön suunnitellun hydraulihybridiauton. Projekti toteutettiin yhteistyössä monen EPA:n yhtiökumppanin kanssa ja mukana kehityksessä oli esimerkiksi UPS ja Eaton [5]. Auto on suunniteltu kaupunkiliikenteeseen ja vähentämään polttoaineen kulutusta, jonka myötä myös ympäristölle haitalliset päästöt vähenevät. Hybridiauto on esitetty kuvassa 8, mutta ulkoapäin se on täysin samanlainen kuin tavallinen dieselkäyttöinen jakeluauto. Hydraulikomponentit ovat sijoitettuna auton sisään. [17]



**Kuva 8.** UPS hydraulihybridiajoneuvo [5].

UPS:n hydraulihybridi on toteutettu sarjahybridinä, joten sen polttomoottorin sammuttaminen on mahdollista liikkumisen aikana. Moottori sammutetaan ajoneuvon ollessa pysähtyksissä esimerkiksi liikennevaloissa. Tällöin tyhjäkäynnillä polttoainetta ei käytetä lainkaan. Moottori on mahdollista pitää sammutettuna myös ajon aikana, erityisesti liikkeelle lähdöissä, jolloin ajoneuvon nopeus ja moottorin kierrosnopeus olisi matala. Polttomoottori ei siis toimisi sen hyvällä tehoalueellaan. Moottorin ollessa sammutettuna, tarvittava ajovoima saadaan hydraulisen paineakun varastoimasta energiasta. Energiaa varastoidaan akkuun

jarrutusten yhteydessä, jolloin pumppumoottori pumppaa hydraulinestettä akkuun samalla hidastaen ajoneuvon nopeutta. [5]

EPA lupaa hydraulihybridinsä säästävän 60–70 prosenttia polttoainetta tavalliseen dieselmoottorilla toimivaan jakeluautoon verrattuna [17]. Tulokset ovat kuitenkin peräisin laboratorio-olosuhteissa tehdyistä testeistä, joten käytännön olosuhteissa polttoaineen kulutus voi olla hieman korkeampi [17]. Lisäksi polttoainesäästöihin vaikuttavat ajoympäristön liikenteen vilkkaus, tarvittavien pysähdysten määrä sekä ajonopeudet. EPA:n tulokset puoltavat väitettä, että kaupunkiajossa hydraulihybridin polttomoottori voisi olla puolet ajoajasta sammutettuna.

Polttoaineen käytön vähentäminen johtaa myös kasvihuonekaasujen vähenemiseen päästöissä. EPA:n mukaan hydraulihybridin hiilidioksidipäästöt vähenevät noin 40 prosenttia tavalliseen jakeluautoon verrattuna [17]. Hybrideillä on siis merkittävä vaikutus myös ilmakehän kasvihuonekaasujen määrään.

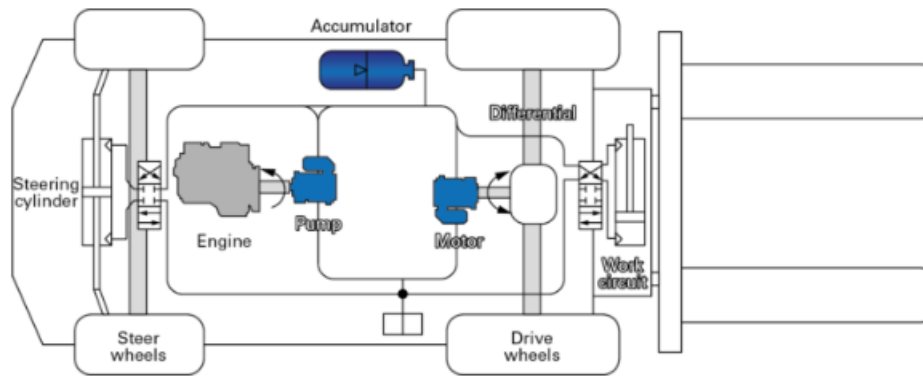
### 5.3 Eaton-trukki

Logistiikassa ja varastoilla on hyvin yleisessä käytössä trukit, joilla materiaaleja siirretään paikasta toiseen. Trukkityöskentelylle on tyypillistä eri painoisten massojen nostelu sekä edestakaiset toistuvat liikkeet nostimella ja ajoliikkeillä. Trukeissa on siis potentiaalisia energiansäästökohteita, erityisesti ajoliikkeen jarrutuksessa. Eaton on valmistanut energiaa säästävän hydraulihybridiversion nestekaasulla toimivasta tavanomaisesta trukista. Kuvan 9 hybriditrukissa energiahäviöitä on ratkaistu muuttamalla voimansiirtoa ja toimimalla moottorin hyvillä tehokkuusalueilla. [2]



**Kuva 9.** Eaton hydraulihybriditrukki [2].

Perusmallissa nestekaasumoottorin energiaa käytetään suoraan vetäville pyörille sekä hydraulipumpulle. Pumpun vastuulla on ohjaavien renkaiden liikuttaminen ja nostoliikkeiden suorittaminen. Hybridimallissa kaikki liike tuotetaan hydraulisesti sarjahybridin avulla. Nestekaasumoottori on kytkettynä hydraulipumppuun, joka pumppaa nestettä sylintereille, hydraulimoottorille tai hydrauliakkuun kuvan 10 mukaisesti. Mekaaninen momentin muunto ja välitys vaihdetaan siis hydrauliseksi voimansiirroksi. Kyseessä on avoin hydraulijärjestelmä, jolloin pumppu ottaa tarvitsemansa nesteen säiliöstä. [2]



**Kuva 10.** Eaton hydraulihybridin rakenne [2].

Hybriditrukin tehokkuus ja koko toiminta perustuu suunnitellun ohjausalgoritmin antamiin käskyihin järjestelmälle, jolloin järjestelmän tulisi toimia saumattomasti eri tilanteissa. Algoritmi ohjaa moottorin kierrosnopeutta, pumpun tilavuusvirtaa, sekä hydraulimoottorin ja ohjausventtiilien tiloja. Energiaa pystytään säästämään monessa eri työkierron vaiheessa, jolloin myös polttoaineen kulutus laskee. [2] Kun trukkia ei liikuteta tai sillä ei tehdä nostoa, polttomoottori kytkeytyy pois päältä. Kun koneen käyttäjä antaa käskyn liikkua, moottori käynnistetään hydrauliakkuun varastoidun energian avulla. Vaihtoehtoisesti tarvittava työ on mahdollista toteuttaa pelkästään akkuun varastoidulla energialla. Järjestelmän tavoitteena on polttomoottorin käyttö sen parhaimmalla tehoalueella kaikissa tilanteissa. Tämä on mahdollista ohjauslogiikalla, säädettävillä moottorilla ja pumpulla, sekä hydrauliakulla. Muiden hybridien tapaan myös ajoliikkeen jarrutusenergia otetaan talteen. Erityisesti trukeissa jarrutuksia tehdään paljon ja tästä syystä jarrut vaativat normaalisti paljon huoltoa. Hydraulijärjestelmän jarrutusominaisuuden myötä, energiaa säästyy ja jarruja ei tarvitse huoltaa yhtä usein. Hydraulihybriditrukkia on verrattu nestekaasumoottorilla toimivaan trukkiin erilaisissa testeissä ja tulosten mukaan jokaisessa testissä hydraulihybridin polttoaineen kulutus oli vähäisempi tavalliseen trukkiin verrattuna. Parhaimmillaan kulutus oli noin 35 prosenttia pienempi. Huomattiin myös, että suurimmat energiasäästöt syntyvät alhaisilla nostonopeuksilla. [2]



## 6. YHTEENVETO

Hydraulihybrideissä sarjakytkentää suositaan hyvän polttoainetehokkuuden takia, mutta myös rinnakkaishybrideitä käytetään, koska ne on helppo asentaa jälkeenpäin tavanomaiseen ajoneuvoon tai työkoneeseen. Sarjahybridi on erityisen hyvä autoille ja liikkuville työkoneille, koska jarrutuksia tulee paljon ja polttomoottorikäyttöä pystytään rajoittamaan ajon aikana. Rinnakkaishybrideillä on monimutkaisempi rakenne ja säätöalgoritmi, mutta sopiva kytkentätapa on silti valittava aina tapauskohtaisesti.

Hydraulihybrideitä on käytössä yllättävän vähän verrattuna sähköhybrideihin, jotka ovat tällä hetkellä erityisesti henkilöautomarkkinoilla valmistajien ja ostajien suosiossa. Sähköhybridin hyvä energiatiheys sopii pieniin henkilöautoihin. Hydraulihybrideitä suositaan erityisesti isommissa ajoneuvoissa ja työkoneissa, koska niissä tarvittavat voimat ovat suuria ja hydraulisäiliöt ja -akut ovat helpompi sijoittaa isoihin runkoihin. Hydraulihybrideillä on myös monipuolisia käyttökohteita jarrutusenergian kierron lisäksi. Esimerkiksi jousiston ja työkonepuomien liikkeistä on mahdollista kerätä potentiaalienergiaa myöhempää käyttöä varten.

Sähköhybridiin verrattuna hydraulihybrideillä on saavutettu suurempia polttoainesäästöjä. UPS:n jakeluauton polttoaineen kulutus on parhaimmillaan 70 % pienempi verrattuna tavanomaiseen dieselmoottorilla toimivaan ajoneuvoon ja samalla sen hiilidioksidipäästöt laskevat 40 %. Vastaavasti Caterpillarin 336E LH -kaivinkone säästää noin neljänneksen polttoainetta samankaltaiseen perusmalliin verrattuna. Polttoaineen säästö ei kuitenkaan kerro suoraan taloudellisesta säästöstä, sillä hybridimallit ovat usein kalliimpia investointeja perusmalleihin verrattuna. Lisäksi monen dieselkäyttöisen työkoneen elinkaari ei ole vielä läheskään lopussa, joten uusia koneita ei haluta ostaa toimivan tilalle, mikä hidastaa hybrideiden kasvua markkinoilla.

## LÄHTEET

- [1] P. Achten, G. Vael, M.I. Sokar, T. Kohmäscher, Design and fuel economy of a series hydraulic hybrid vehicle, J-Stage, Issue 7-1, 2008, pp. 47-52, Saatavissa: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isfp1989/2008/7-1/2008\\_7-1\\_47/article/-char/en#author-information-wrap](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isfp1989/2008/7-1/2008_7-1_47/article/-char/en#author-information-wrap) (viitattu 10.6.2020).
- [2] A. Bonanomi, Efficiency with Hydraulics Hybrid Lift Truck Technology, Power Transmission world, 31.06.2017, Saatavissa <https://www.powertransmissionworld.com/efficiency-with-hydraulics-hybrid-lift-truck-technology/>.
- [3] D. Brnčić, G. Gregov, Numerical simulation study of parallel hydraulic hybrid system for a delivery van, Semantic Scholar, 2017, Saatavissa <https://www.semanticscholar.org/paper/NUMERICAL-SIMULATION-STUDY-OF-PARALLEL-HYDRAULIC-A-BRN%C4%8CI%C4%86-Gregov/95b25829e5644ef877e2bf6e790d946f125a5439> (viitattu 26.2.2020).
- [4] J.S. Chen, Energy Efficiency Comparison between Hydraulic Hybrid and Hybrid Electric Vehicles, MDPI, May 2015, Saatavissa [https://www.researchgate.net/publication/326010424\\_Hydraulic\\_hybrid\\_vehicle\\_configurations\\_and\\_comparison\\_with\\_hybrid\\_electric\\_vehicle](https://www.researchgate.net/publication/326010424_Hydraulic_hybrid_vehicle_configurations_and_comparison_with_hybrid_electric_vehicle) (viitattu 20.3.2020).
- [5] R. Hall, J.J. Kargul, Hydraulic hybrid promises big savings for UPS, Hydraulics & Pneumatics, 17.10.2006, Saatavissa <https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/hydraulic-pumps-motors/article/21884820/hydraulic-hybrid-promises-big-savings-for-ups> (viitattu 14.4.2020).
- [6] How Parallel Hydraulic Hybrid Vehicles Work, EPA, Saatavissa <https://archive.epa.gov/otaq/technology/web/html/how-it-works-parallel.html> (viitattu 27.1.2020).
- [7] How Series Hydraulic Hybrid Vehicles Work, EPA, Saatavissa <https://archive.epa.gov/otaq/technology/web/html/how-it-works.html> (viitattu 16.2.2020).
- [8] L. Hietalahti, Sähkökäyttö- ja hybriditekniikka ajoneuvo- ja työkonikäyttöön, Tammer-teknikka, 2011.
- [9] T.H Ho, K.K. Ahn, Design and control of a closed-loop hydraulic energy-regenerative system, Automation in construction, vol. 22, March 2012, pp. 444–458.
- [10] S. Hui, J. Ji-Hai, W. Xin, Torque control strategy for a parallel hydraulic hybrid vehicle, Journal of Terramechanics, vol. 46, issue 6, December 2009, pp. 259–265.
- [11] J. Kuusjärvi, Caterpillarilta sähkötön hybridi, Koneporssi, 19.08.2013, Saatavissa <https://koneporssi.com/tyokoneet-2/caterpillarilta-sahkoton-hybridi/>.
- [12] A. Käyhö, Caterpillar-höyrykoneesta hybridin, Laaksonen, 2014, s. 45–47.
- [13] H. Sun, L. Yang, J. Jing, Y. Luo, Control strategy of hydraulic/electric synergy system in heavy hybrid vehicles, Energy Conversion and Management, vol. 52, Issue 1, January

- 2011, pp. 668–674, Saatavissa <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0196890410003559?via%3Dihub> (viitattu 20.3.2020).
- [14] V. Tvrđić, S. Podrug, D. Jelaska, M. Perkušić, Model of a hydraulic hybrid vehicle with regenerative suspensions, University of Split (Croatia), Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, January 2018, Saatavissa [https://www.researchgate.net/publication/322931483\\_Model\\_of\\_a\\_hydraulic\\_hybrid\\_vehicle\\_with\\_regenerative\\_suspensions](https://www.researchgate.net/publication/322931483_Model_of_a_hydraulic_hybrid_vehicle_with_regenerative_suspensions) (viitattu: 19.4.2020).
- [15] VERNEn laskelma autoilun kustannuksista, Traficom, saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/ajavaihtoehtoa/vernen-laskelma-autoilun-kustannuksista> (viitattu 11.8.2020).
- [16] M. Vukovic, R. Leifeld, H. Murrenhoff, STEAM – a hydraulic hybrid architecture for excavators, RWTH Aachen University, Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS), 2016, Saatavissa <https://pdfs.semanticscholar.org/4319/f5e2a83f04063508b33251fb1024c5a76713.pdf>.
- [17] World's First Full Hydraulic Hybrid in a Delivery Truck, EPA, 2005, Saatavissa [https://archive.epa.gov/midwestcleandiesel/web/pdf/hydraulic\\_hybrid5.pdf](https://archive.epa.gov/midwestcleandiesel/web/pdf/hydraulic_hybrid5.pdf) (viitattu: 14.4.2020).
- [18] L.J Zhu, Experiment for a Parallel Hydraulic Hybrid Terminal Tractor, Applied Mechanics and Materials, Vol. 543-547, March 2014, pp. 211–214.